



# Un langage de modélisation des comportements complexes de la matière pour la construction d'objets physiques simulables

Gilles Pommereuil, Annie Luciani

## ► To cite this version:

Gilles Pommereuil, Annie Luciani. Un langage de modélisation des comportements complexes de la matière pour la construction d'objets physiques simulables. 18ème conférence internationale sur la CFAO et les nouvelles technologies de conception et de fabrication, 1999, Paris, France. pp.75-90. hal-00910606

**HAL Id: hal-00910606**

**<https://hal.science/hal-00910606>**

Submitted on 3 Jun 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

---

# Un langage de modélisation des comportements complexes de la matière pour la construction d'objets physiques simulables

Gilles Pommereuil — Annie Luciani

ACROE, INPG  
46, avenue Félix Viallet  
F-38031 Grenoble cedex

---

**RÉSUMÉ.** *La fabrication d'une séquence d'images de synthèse requiert aujourd'hui l'utilisation de deux composants séparés : le processus de synthèse des formes spatiales et le processus de synthèse des mouvements. Le formalisme CORDIS-ANIMA permet de construire des modèles dont les caractéristiques géométriques et le mouvement sont décrits de façon unifiée, au moyen des seuls concepts de point matériel et d'interaction physique. Nous présentons dans cet article un langage qui permet, dans le formalisme CORDIS-ANIMA, de décrire les interactions physiques non linéaires au moyen d'automates à états. Ce langage s'applique à la construction de modèles pour certains comportements complexes de la matière, comme la plasticité ou l'adhérence.*

**ABSTRACT.** *To simulate 3D physical behaviour with computer, we need two different components: the computer graphics process and the computer animation process. The CORDIS-ANIMA formal representation system allows to build computer models in which shapes and motions are closely linked by means of the single concept of interacting punctual masses. In this paper, we present a computer language which extends the CORDIS-ANIMA formalism with finite state automata in the aim to describe easily highly non-linear physical interactions and to design some complex material behaviours such as plasticity or adherence.*

**MOTS-CLÉS :** *modèle physique, comportement non linéaire, automate d'états, modélisation 3D, CAO, animation, prototypage virtuel.*

**KEY WORDS:** *physical modelling, non-linear behaviour, finite state automata, 3D modelling, CAD, computer animation, virtual prototyping.*

---

## Introduction

La fabrication d'une séquence d'images de synthèse requiert aujourd'hui l'utilisation de deux composants séparés : le processus de synthèse des formes spatiales et colorées et le processus de synthèse des mouvements. Jusqu'au milieu des années 70, ces deux composants ont fait l'objet de développements à peu près équivalents. Une priorité marquée s'est ensuite établie pour la synthèse des formes et des couleurs, portée en grande partie par l'envergure des nécessités et retombées applicatives de la CAO dans diverses branches de l'activité technologique



(construction mécanique, architecturale...). Depuis le milieu des années 80, des développements intenses se sont effectués en synthèse du mouvement, avec en particulier de nombreux travaux dédiés à la modélisation des déformations et l'apparition des modèles physiques générateurs de cinématiques.

Au stade de développement actuel, tant des modèles génériques de formes que des modèles génériques de mouvements (de cinématiques), il semble nécessaire et naturel de jeter une passerelle, au niveau des modèles eux-mêmes, entre les modèles de formes et les modèles de mouvements. En effet, dans un processus de conception assistée par ordinateur, de multiples représentations d'un objet ou d'un assemblage d'objets sont nécessaires et supposent le développement approfondi de modèles de différentes natures (modèle des caractères géométriques, modèle des comportements cinématiques et dynamiques, modèle des comportements thermiques...).

Complémentairement aux travaux dont l'objectif est de faire communiquer ces différentes représentations, cette passerelle conduirait ici à définir des modèles introduisant des critères dynamiques dans la conception des formes, de façon à faciliter la conception par l'étude comportementale d'objets ou d'assemblage d'objets complexes. Ceci est d'autant plus important que les domaines de la CAO et de la synthèse d'images s'élargissent considérablement aux objets déformables, pour lesquels la forme spatiale stable, descriptible de manière purement géométrique, est de plus en plus difficile à cerner. C'est le cas, par exemple, des objets que traitent les industries alimentaire ou vestimentaire, les industries pharmaceutique ou cosmétique, en chirurgie ou en médecine et, d'une manière générale, dans tous les domaines s'intéressant aux objets non manufacturables par des machines d'usinage.

Le travail présenté ici correspond à l'extension d'un outil de modélisation physique en synthèse d'images, l'outil CORDIS-ANIMA. Elle consiste en l'adjonction d'un sous-langage de modélisation de comportements complexes, d'une manière la plus expérimentale et la plus proche possible des perceptions immédiates. Il s'agit plus particulièrement des comportements non linéaires à mémoire (plasticité, collages, fractures). L'approche proposée est une approche phénoménologique : l'opérateur caractérise ces phénomènes par des automates d'états macroscopiques, les principes de physicalité de CORDIS-ANIMA assurant la cohérence physique de l'ensemble.

Après avoir positionné cette démarche dans les processus de modélisation usuels en CAO et synthèse d'images (§ 1), puis avoir donné les éléments du modèleur-simulateur CORDIS-ANIMA nécessaires au travail présenté (§ 2), nous décrirons le langage LCM de modélisation des Liaisons Conditionnelles à Mémoire (§ 3 et 4) et donnerons quelques exemples qui illustreront la simplicité de construction de comportements non linéaires pourtant physiquement complexes (§ 5).

## 1. Modélisation physique versus modélisation géométrique

Nous avons mis l'accent dans l'introduction dans le découpage en deux parties du processus de modélisation de scènes dynamiques.

La synthèse de formes spatiales a consisté tout d'abord en une description explicite des formes 2D ou 3D, dont les principaux types génériques de représentation sont :

- les représentations basées sur des primitives géométriques telles que le formalisme CSG (*Constructive Solid Geometry*) ou la facettisation de contour,

- les représentations basées sur des pavage de contours par fonctions mathématiques telles que la description de surfaces par cubiques, quadriques, Nurbs, etc.,

- les numérisations adaptatives telles que les représentations quadrees et octrees...

Dans tous ces cas, la définition du mouvement qui correspond à ces modèles de forme fait appel à des modèles de type cinématique, dans lesquels le temps est une variable explicite. Ces principaux modèles de mouvement sont : l'échantillonnage image par image, la description par états clés et fonction d'interpolation, la description par fonction d'évolution interactive, le calcul de fonctions cinématiques. L'animation est donc produite par la donnée ou le calcul explicite d'un ensemble de translatées, déformées ou transformées des primitives décrivant la forme spatiale.

Dès lors que l'on veut atteindre une certaine résolution, et donc une certaine variabilité dans les changements de forme, on aura tendance à prendre des éléments de discrétisation spatiale de plus en plus petits. Apparaissent alors les modèles dits « particuliers ». Les premiers modèles particuliers ont été des modèles géométrico-cinématiques dans lesquels la primitive géométrique élémentaire pour décrire les formes spatiales est le point, et dans lesquels la description du mouvement reste de type cinématique, c'est-à-dire à temps explicite. Ces modèles particuliers ont été naturellement complétés par les représentations de type surfaces implicites, dont l'objectif est de reconstruire un encombrement spatial à partir d'un squelette. Lorsqu'il s'agit de modèles particuliers, ce squelette est constitué d'un ensemble de points. Dans ces cas, la description de l'encombrement spatial apparent des objets devient implicite et la description des mouvements reste, quant à elle, à temps explicite.

Si l'on veut de plus atteindre ou maintenir une certaine cohérence ou une certaine généralité dans la suite des déformées, qu'elles soient décrites par des primitives à gros grain comme dans les arbres CSG, à grain moyen comme dans les facettisations, les pavages par fonctions mathématiques ou les discrétisations adaptatives, ou à grain fin comme dans les modèles particuliers, un modèle amont sera un modèle à fonction principale sera d'être générateur de cinématique et qui donc sera un modèle à temps implicite. Les modèles dits « physiques » dans lesquels les cinématiques sont produites par résolution de systèmes différentiels sur le temps, sont de ce type.

L'association d'un modèle physique générateur de cinématique et d'une discrétisation particulière sera recherchée chaque fois que l'on souhaite en même temps une assez grande généralité en matière de mouvement et une assez grande variabilité en termes de déformation. Ce sera le cas des objets qui nous intéressent ici : pâtes plastiques ou organiques, matériaux plus ou moins informes, structures peu élastiques mais à grande déformation (filaments, tissus manufacturés ou organiques ...), comportements irréversibles de type hystérésis, striction, fractures, fissuration et écrouissage, etc.

Cette association revient à adopter comme principe de base de la modélisation physique la décomposition de la matière et de la forme en « points matériels en interaction ». Elle combine deux niveaux de description implicite :

- forme implicite : la forme est tout d'abord condensée en points, puis expansée par des fonctions d'espace (fonctions potentielles) [MPG97],

- temps implicite : les cinématiques structurées sont générées par des processus à temps implicite.



## 2. Modélisation physique avec CORDIS-ANIMA

Le modèleur-simulateur CORDIS-ANIMA adopte le point de vue développé en fin du paragraphe précédent : choix de la physique du point matériel pour décrire les formes et les mouvements.

Ce paragraphe ne sera pas une description du formalisme ni du logiciel résultant déjà décrit dans [CAD 93]. Il insistera sur une des propriétés de ce formalisme, celle de pouvoir construire des modèles de phénomènes complexes tout en assurant syntaxiquement une certaine cohérence physique.

### 2.1. Choix des opérateurs physiques

Du point de vue formel, il convient, lorsque l'on parle de physique ou de modèle physique, de dissocier la connaissance phénoménologique et les théories associées (gravitation, milieux continus, mécanique du solide...), des opérateurs formels avec lesquelles ces connaissances phénoménales sont éventuellement amenées à s'exprimer.

Dans l'assertion « modèle physique » que nous utilisons, « physique » est à considérer comme le qualificatif de modèle, et prend donc la signification précise de modèle construit avec les opérateurs de la physique. Ainsi, il existe deux grands types d'opérateurs équivalents susceptibles de représenter sans conteste la majorité des faits physiques macroscopiques : l'opérateur basé sur le principe d'action - réaction et dont le descripteur est la notion de force, l'opérateur basé sur le principe de moindre action, et dont le descripteur est originellement appelé « Action de Maupertuis » ou « Action Hamiltonienne ».

Le premier système de représentation donne lieu à des représentations différentielles des phénomènes, le second à des représentations intégrales. Le premier définit l'état dynamique d'un corps « pas à pas », déterminant le mouvement localement et de proche en proche. Le second oblige à considérer le mouvement globalement, comme un point d'un espace où sont représentés l'ensemble des mouvements possibles. Il en découle de manière évidente que le premier est d'intention plus calculatoire. Nous pourrions parler d'une « mécanique (ou physique) algébrique », contrairement au second qui a fondé la mécanique (ou physique) « analytique » et qui semble d'intention plus « analytique ». C'est pour ces raisons que CORDIS-ANIMA, langage de modélisation et de simulation numérique de phénomènes morphodynamiques se fonde sur le premier formalisme.

Ce formalisme, appelé ci-dessus « physique algébrique » est fondé sur la dualité des variables en termes de variables intensives et variables extensives et sur le principe d'action-réaction. Ses bases axiomatiques sont :

Variables duales  $[X, X^*]$

Composant 1  $X = a.X^*$

Composant 2  $X = c. dX^*/dt$

Composant 3  $X = b. SX^* dt$

Composant 4 Non-linéarités de base

Composant 5 sources  $\rightarrow X$  (ou  $X^*$ )

Composant 6 transformateurs  $X(\text{resp } X^*) \rightarrow X(\text{resp } X^*)$

Règle 1 aux nœuds  $S X(\text{resp } X^*) = 0$

Règle 2 : sur une maille  $S X^*(\text{resp } X) = 0$

Le formalisme CORDIS est une réécriture algorithmique de ces règles (dans la suite du texte, la variable intensive  $X$  aura la signification d'une position et la variable intensive  $X^*$  celle d'une force  $F$ ) [CAD 93].

Cette réécriture algorithmique introduit (figure 1) :

(1) Le typage des composants : les composants 1, 2 et 4 sont regroupés et sont nommés LIA; le composant 3 est appelé MAT.

(2) La notion d'entrée-sortie (c'est-à-dire l'orientation des connexions) : pour les composants MAT, la variable intensive est en entrée et la variable extensive en sortie, et réciproquement pour les composants LIA.

(3) L'association par paire des entrées-sorties (Entrée, Sortie): Chaque paire définit un point de communication. Les points de communication se déclinent en deux types, selon la nature de leur variable d'entrée et de leur variable de sortie :

-  $(F, X)$  point de communication de type nommé M,

-  $(X, F)$  point de communication de type nommé L.

(4) La prise en compte du temps de calcul sous forme de délai dans les algorithmes calculant chacun des composants.

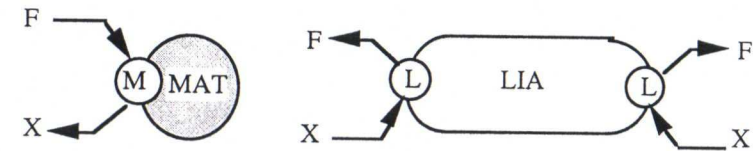


Figure 1. Les composants [MAT, LIA] et les points de communication [M, L] dans le formalisme CORDIS

### 2.2. La notion de réseau dans la problématique du modèle physique

Se superpose aux choix des variables et de la syntaxe de base, le choix d'un système d'écriture de modèles physiques. L'écriture sous forme de systèmes d'équations différentielles, si elle offre des avantages en termes de techniques de résolution, apporte insuffisamment d'aide à la conception du modèle. En effet, une tâche relativement difficile en écriture de systèmes dynamiques est d'effectuer correctement « le bilan des forces », plus généralement le bilan des variables intensives circulantes. Cette tâche est facilitée dans une écriture du type réseau dont l'exemple le plus connu sont les réseaux de Kirchhoff (déjà cités) très utilisés en électricité. En effet, la topologie du réseau, pour peu que les règles syntaxiques de connexion soient toutes assurées, garantit formellement le bilan de la circulation des variables intensives, via la propriété de « clôture du réseau ».

Le type de formalisme ci-dessus se prête à l'écriture du système d'équations différentielles modélisant le phénomène dynamique sous forme de réseaux. Tout objet ou phénomène dynamique sera modélisé dans CORDIS-ANIMA par un réseau (figure 2) composé par les deux composants et les règles définies ci-dessus : les composants MAT (calculant un comportement local  $Cli$ ) ; et les composants LIA (calculant une interaction  $I_j$  représentant la corrélation instantanée entre deux comportements locaux) ; les règles de connexion garantissant la physicalité du réseau. La « clôture du réseau » sera obtenue lorsque tous les composants seront connectés de manière conforme aux règles.



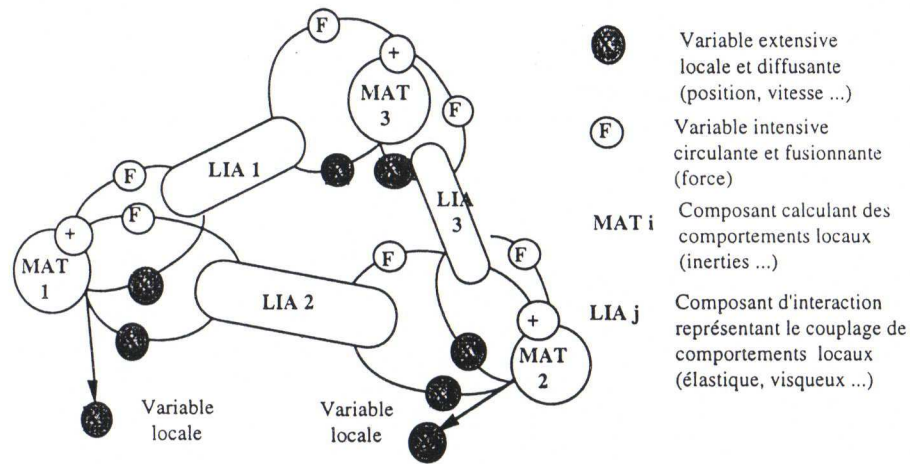


Figure 2. Les réseaux CORDIS

### 2.3. Les classes de phénomènes accessibles

Une des propriétés les plus importantes de ce type de langage de conception de modèles est de rendre accessible l'écriture de modèles de phénomènes complexes intégrant des fortes non-linéarités. Les composants non linéaires, assimilés à des composants LIA et descriptibles par des automates d'états, s'intercalent en bonne place dans le réseau. La suite du texte approfondit la notion d'interaction et de composants discrets qui la supporte et généralise l'introduction d'automates d'état dans les réseaux de type CORDIS.

## 3. Modélisation d'interactions physiques simples

### 3.1. Interaction physique

Une interaction physique est une relation abstraite pour décrire le comportement de deux objets dont les mouvements sont supposés corrélés. C'est une écriture en compréhension de l'ensemble des mouvements possibles de ces deux objets considérés comme un système isolé. Elle exploite l'idée d'une action réciproque exercée par les objets l'un sur l'autre et en donne une expression sous la forme d'une loi calculant des forces.

Les éléments perceptifs de base dans l'observation du mouvement relatif de deux objets (ou de deux points d'un même objet) sont le *rapprochement* et l'*éloignement*. De ces deux éléments perceptifs, on peut déduire les relations d'interaction élémentaires d'*attraction* et de *répulsion*, par une démarche intuitive d'élucidation des causes du mouvement. On prétendra ainsi que deux objets qui se rapprochent

sans qu'apparaisse une raison extérieure à ce mouvement, exercent une action d'attraction l'un sur l'autre. De même, deux objets qui s'éloignent spontanément seront supposés avoir une action de répulsion l'un sur l'autre. A ces deux interactions élémentaires, nous ajouterons une troisième : *l'amortissement*. C'est l'interaction déduite du comportement de deux objets qui, mis en mouvement relatif par une tierce intervention, tendent spontanément à équilibrer leurs vitesses.

### 3.2. Modélisation des comportements élémentaires avec Cordis-Anima

Le formalisme CORDIS-ANIMA associe la notion de liaison au concept physique d'interaction. Une liaison CORDIS-ANIMA (atome LIA) est un module capable de communiquer avec deux atomes MAT. Ses entrées sont les positions spatiales des deux atomes MAT auxquels elle est liée, et ses sorties sont deux forces à destination de ces deux atomes. La liaison CORDIS-ANIMA ne prend en compte que la position relative et la vitesse relative de deux points qu'elle lie. Les forces produites doivent satisfaire le principe d'action-réaction, c'est-à-dire qu'elles sont colinéaires, de sens opposés, égales en intensité, et portées par l'axe des points matériels en interaction.

La figure 3 montre les mécanismes algorithmiques intégrés d'un module LIA. Le cadre grisé représente l'unique partie variable d'un module LIA : la fonction d'interaction. La liaison CORDIS-ANIMA telle qu'elle est décrite dans cette figure ne définit pas une loi d'interaction particulière : elle impose seulement à toute liaison un modèle de fonctionnement qui la rend conforme au principe d'action-réaction. Le module LIA peut ensuite être décliné en plusieurs types de liaisons correspondant à diverses possibilités de modélisation de fonctions d'interaction.

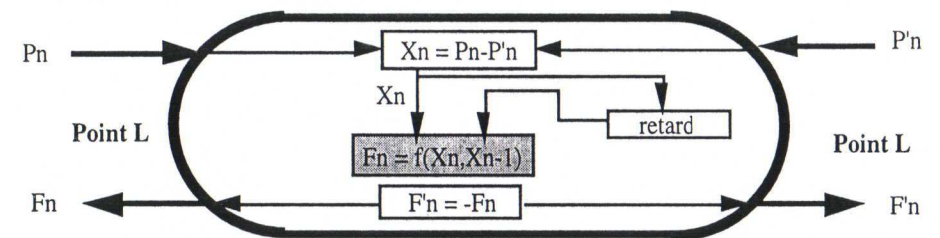


Figure 3. Mécanisme algorithmique d'un composant LIA, support du calcul d'une interaction physique

### 3.3. Module paramétrique REF

Le formalisme CORDIS-ANIMA définit un type de module LIA spécialement conçu pour la modélisation des comportements élémentaires définis au début de cet exposé : attraction, répulsion, et amortissement. Ce type de liaison, appelé REF, correspond au modèle mathématique d'interaction visco-élastique linéaire. Le modèle physique couramment associé est le Ressort-Frottement.



Modèle REF :  $F = -k.(X-L) - z.V$   
 $k$  : coefficient d'élasticité linéaire (raideur)  
 $L$  : longueur au repos de la liaison  
 $z$  : coefficient de viscosité linéaire

Le modèle REF répond aux besoins de modélisation des comportements physiques élémentaires. Il rend cette modélisation très immédiate. Son association à la topologie CORDIS-ANIMA permet la modélisation de tous les systèmes physiques dont l'évolution est régie par une équation différentielle linéaire à coefficients constants.

#### 4. Modélisation d'interactions composées

##### 4.1. Modèle fonctionnel d'interaction physique

Une interaction physique est une loi qui produit un couple de forces en fonction d'un certain nombre d'entrées (on dira un **vecteur** d'entrée). Le mode de calcul du couple de forces peut changer au cours du temps : il peut par exemple être altéré par une configuration particulière des deux objets en interaction, comme c'est le cas pour un ressort dont on dépasse le seuil d'élasticité et qui se déforme : l'interaction qu'il produit entre ses deux extrémités n'est plus la même. Une liaison physique générale est donc une loi de calcul d'un couple de forces en fonction de la série des vecteurs d'entrée reçus depuis l'origine de son existence.

On peut isoler dans la série des vecteurs d'entrée le plus récent d'entre eux (le dernier de la série) et appeler l'ensemble des termes restants « historique de la liaison ». Une liaison physique calcule en fonction de son vecteur d'entrée immédiat et de son « historique » une sortie de type couple de forces (colinéaires, égales en intensité et de sens opposés). L'historique d'une liaison tel que nous le définissons n'étant pas une notion algorithmiquement exploitable, elle nécessite une simplification. On admettra que parmi les vecteurs d'entrée reçus, certains ont une signification « historique » particulière et d'autres non. On admettra également que la liaison possède un nombre fini d'états, chaque état étant caractérisé par la mise en œuvre d'une fonction (vecteur d'entrée immédiat → couple de forces) spécifique, et que les événements historiquement significatifs déterminent les transitions entre ces états.

##### 4.2. Modèle de liaison conditionnelle (LIC)

Le formalisme CORDIS-ANIMA propose en complément du module de liaison REF, un type de module de liaison conditionnelle, appelé LIC. Le modèle LIC offre un moyen simple de représentation des états d'une liaison, des transitions possibles entre ces états, et des fonctions d'interaction qui leur sont associées. Il permet de décrire un automate dont chaque état correspond à un triplet de paramètres ( $k, L, z$ ), et dont les transitions sont étiquetées par des conditions portant sur les entrées ( $X, V$ ) d'une liaison (figure 4). Une liaison LIC définit un tableau de triplets de paramètres ( $k, L, z$ ), qui représentent un ensemble de plans de l'espace ( $F, X, V$ ). Le mécanisme transitoire de l'automate associé code le chemin parcouru par le point d'interaction sur cet ensemble de plans.

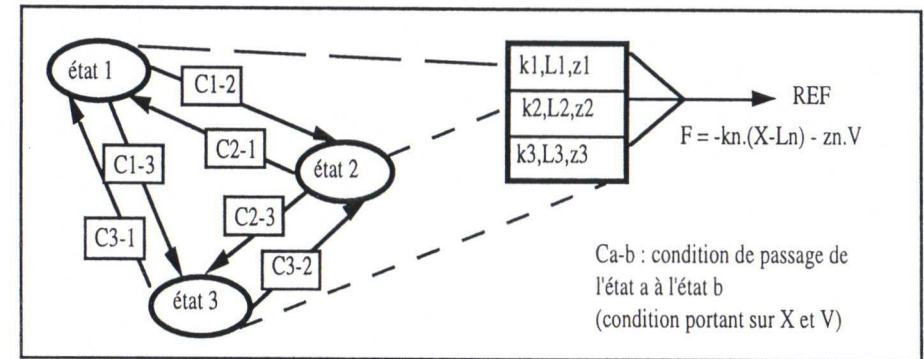


Figure 4. Automate d'états du composant LIC

Le formalisme LIC est le premier modèle générique d'interaction non linéaire intégré à CORDIS-ANIMA. Il a permis de modéliser de nombreux types d'interactions, et de valider des modèles de cohésion [LG 97], de cohésion à deux états stables (agglomérats compressibles) [CL 96], de plasticité [JL 93], de frottement d'archet [FC 90].

#### 5. Un modèle plus général d'interaction physique

##### 5.1. Exemple de l'interaction de plasticité

La liaison CORDIS-ANIMA de type REF permet de modéliser une interaction d'élasticité linéaire parfaite. Or, pour la plupart des matériaux solides, le domaine de réversibilité de l'élasticité est limité : il existe un seuil d'allongement, appelé seuil de plasticité, au-delà duquel la structure physique d'un matériau donné se détériore, au point de modifier ses propriétés élastiques et son aspect géométrique. C'est ce qu'on appelle un comportement plastique. Lorsque les contraintes appliquées à un objet plastique sont trop importantes, il se brise en morceaux : il existe donc un seuil de rupture au-delà duquel une liaison plastique se rompt.

La plasticité est un comportement à mémoire : il est très immédiat de constater à l'expérimentation qu'il existe une mémoire de déformation des objets, avec parfois de nombreux états intermédiaires allant de « tordu » à « brisé ». S. Jimenez [JL 93] a élaboré un modèle algorithmique à plusieurs états pour l'interaction de plasticité. La courbe décrite par la figure 5 donne une représentation de ce modèle.

Ce modèle est représentable par une liaison de type LIC. La description de l'automate sera cependant d'autant plus complexe qu'il existera d'états de détérioration intermédiaires. Pourtant, le phénomène en lui-même est simple à décrire, car il se reproduit identique à lui-même au cours de la détérioration : les portions de courbes 2,3 et 4 se déduisent chacune de la première par une simple translation, et la simulation du phénomène consiste à réaliser cette translation à chaque fois que l'allongement dépasse un seuil critique.



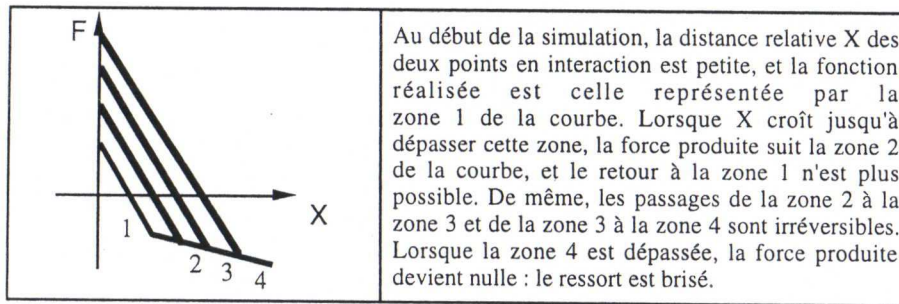


Figure 5. Courbe de comportement plastique

### 5.2. Modèle d'interaction à mémoire et adaptativité

Les interactions non linéaires adaptent dynamiquement leur comportement à leur contexte. Le contexte d'une liaison est la confrontation de son état courant et de ses entrées courantes. On appellera adaptativité d'un type de liaison sa capacité structurelle à modifier son comportement en fonction de son contexte. L'adaptativité de la liaison LIC est très simple à caractériser : elle consiste à pouvoir choisir l'un des segments d'une courbe linéaire par morceaux en fonction d'une analyse *logique* du contexte. Mais elle ne permet pas, par exemple, de tenir compte de l'allongement maximal qu'atteint un ressort pendant l'élongation qui cause sa détérioration (sinon de façon discrète, en proposant plusieurs états correspondant à plusieurs longueurs d'élongation excessives).

Pourtant, il importe de pouvoir effectuer l'adaptation d'une liaison à un contexte non seulement *logique* : par exemple « telle quantité a excédé tel seuil », mais également *numérique* : par exemple « telle quantité a excédé tel seuil de tant » ; *tant* devient alors une valeur caractéristique de l'état de l'interaction et interviendra dans le calcul du couple de forces produit. Pour que cette mémorisation d'un contexte quantitatif puisse avoir une incidence sur le comportement de la liaison, il faut que les valeurs  $k, L, z$  produites à destination de l'algorithme REF puissent être calculées dynamiquement. On en vient à abandonner le tableau de triplets  $(k, L, z)$  du formalisme LIC pour adopter un tableau de triplets de ces valeurs en fonction du contexte logique et numérique de la liaison (c'est-à-dire son état). On élabore alors un nouveau modèle d'automate, dont l'état est caractérisé à chaque instant par un ensemble de variables, et dont chaque état logique est associé à un triplet de fonctions permettant de calculer les paramètres  $k, L, z$  dynamiquement à partir de données numériques du contexte de la liaison.

Cette conception étendue de l'automate a permis de définir un nouveau type de module LIA pour le formalisme CORDIS-ANIMA, aux possibilités plus vastes que la liaison LIC. Les liaisons ainsi construites sont appelées Liaisons Conditionnelles à Mémoire (LCM). Leur description plus complète est donnée au paragraphe suivant.

## 6. Langage LCM pour la modélisation des interactions non linéaires

Le formalisme LIC permettait à une liaison de conserver une mémoire de son historique sous la forme d'un état choisi parmi un nombre fini d'états possibles. Le formalisme LCM substitue à cette notion d'état un ensemble de variables internes à la liaison, de types logique ou numérique, qui mises en commun constituent une codification de l'historique de la liaison. Ces variables sont transitoires : leur valeur est réévaluée à chaque pas de simulation, grâce à une fonction de transition qui leur est associée. Une fonction de sortie permet de délivrer un triplet de valeurs  $(k, L, z)$  à chaque pas de simulation, calculées à partir d'expressions conditionnelles et numériques portant sur les entrées ( $E$ ), paramètres algorithmiques ( $P$ ), et variables internes ( $V$ ) de la liaison. Comme pour le modèle LIC, le triplet  $k, L, z$  obtenu sert au calcul d'une interaction de type REF.

Une liaison LCM est caractérisée par deux ensembles  $V$  et  $P$  de variables internes et de paramètres algorithmiques, par une fonction de transition  $f$ , et par une fonction de sortie  $g$ . Le cycle de calcul d'une liaison LCM, effectué à chaque pas de la simulation, est constitué des quatre phases suivantes (figure 6) :

1. Top variables : basculement des variables d'état  $V$  :  $\text{prec}(V) = V$  ;  $V$  est invalidée.
2. Calcul de transition : la valeur courante de chaque variable de l'automate LCM est calculée selon sa fonction de transition :  $V = f(E, P, \text{prec}(V))$
3. Calcul de sortie : les sorties sont les trois paramètres  $k, L, z$  :  $S = g(E, P, V, \text{prec}(V))$
4. Calcul de l'algorithme REF : les forces produites par l'interaction visco-élastique linéaire paramétrée par les sorties de l'automate LCM sont calculées.

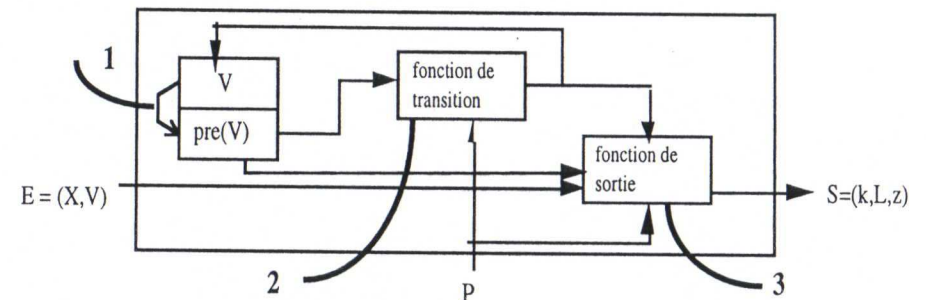


Figure 6. Schéma de la liaison LCM

Les fonctions de sortie et de transition permettent la combinaison d'expressions conditionnelles et numériques de complexité quelconque, pour la réévaluation de chaque variable transitoire et l'évaluation de chaque sortie.

L'étude des liaisons LCM a conduit à l'élaboration d'un langage pour la modélisation de liaisons non linéaires, annexé au formalisme CORDIS-ANIMA. De nouveaux types d'interactions non linéaires ont été développés et ont servi à concevoir de nouveaux modèles. Le paragraphe suivant en présente quelques exemples.



## 7. Exemples de modèles

### 7.1. Modèle d'objet plastique

Un modèle d'interaction de plasticité a été développé en langage LCM. Son comportement est défini par une altération récursive de la longueur au repos  $L$  d'une liaison visco-élastique linéaire. Il est paramétré par un seuil de plasticité et un coefficient de déformation. Si à un moment de la simulation l'allongement de la liaison devient inférieure à  $L^*(1-\text{seuil})$ , la longueur au repos  $L$  est changée en  $L^*(1-\text{coefficient})$ . Il s'agit donc d'une liaison à un seul état, paramétré par une longueur au repos  $L$  variable (figure 7). Le coefficient de déformation est inférieur au seuil de plasticité pour que la liaison ne « s'écrase » pas au franchissement du seuil de plasticité.

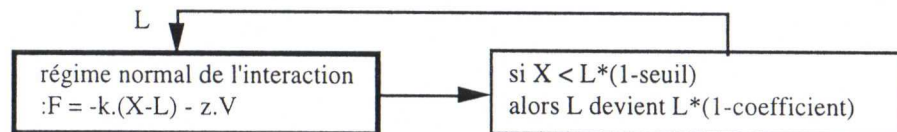


Figure 7. Modèle élémentaire d'interaction plastique

Cette fonction d'interaction a été testée sur un modèle bidimensionnel défini par un maillage carré de  $7 * 7$  points matériels en interaction deux à deux selon leurs adjacences verticales, horizontales et diagonales par des liaisons plastiques. Ce solide est bombardé par cinq masses. Les déformations successives acquises par l'objet après chaque impact sont très réalistes. Des images de cette simulation sont présentées à la fin de cet article.

### 7.2. Modèle de frottement sec : adhérence d'un véhicule motorisé

Les modèles de véhicules précédemment développés à l'ACROE par Jimenez [JL 93] et Chanclou [CL 96] exploitaient un modèle de frottement sec [JL 93], décrit comme une interaction générant des forces non axiales (c'est-à-dire qui ne sont pas portées par l'axe des deux points matériels en interaction). Nous proposons ici un modèle de frottement sec fondé sur une interaction de butée asymétrique adhésive axiale développée en langage LCM. Ce modèle fait intervenir un niveau de discrétisation supérieur à celui des modèles précédents. Le frottement sec axial doit faire intervenir plusieurs forces axiales exercées entre plusieurs éléments d'une roue et plusieurs éléments du sol, et dont la résultante globale est un moment de rotation appliqué à la roue.

Ce modèle de butée asymétrique adhésive se comporte comme une butée visco-élastique lors de la collision de deux sphères (figure 8.a). Lorsque le travail de la force de répulsion devient positif, la courbe de butée est modifiée de façon à créer une zone d'attraction avant la désolidarisation complète des deux sphères en interaction

(figure 8.b). Cette butée asymétrique frottante produit une force continue. C'est un modèle de force dissipative même à viscosité nulle : l'intégrale du cycle d'interaction (butée, accrochage, décrochage) est négative.

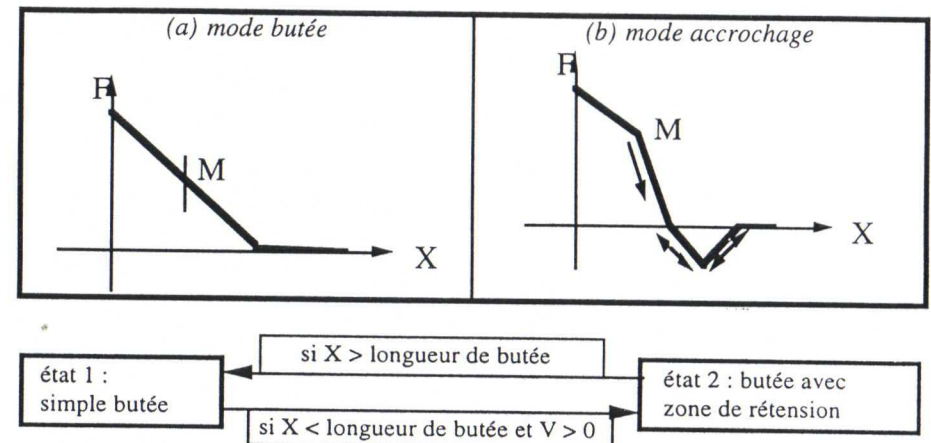


Figure 8. Modèle de butée asymétrique frottante

Nous avons modélisé un véhicule comportant deux roues de 12 masses périphériques chacune et d'une masse centrale. La roue arrière est motrice. Une interaction de butée asymétrique adhésive est placée entre chacune des 12 masses périphériques des roues et chaque élément du sol.

### 7.3. Modèle de butée adhésive

Le modèle d'adhérence de goutte d'eau dérive d'expérimentations réalisées sur la modélisation du frottement sec par des forces d'accrochage axiales. Il se comporte comme une butée asymétrique qui produit des forces de répulsion à la pénétration, puis d'attraction lors de l'éloignement immédiatement consécutif à la collision. Il a été utilisé ici pour la simulation de la collision d'une goutte d'eau en chute libre avec une sphère fixe.

Le modèle de butée asymétrique utilisé comme modèle d'adhérence de goutte d'eau est assez différent du principe d'accrochage mis en œuvre dans le modèle de véhicule motorisé. Lors du rapprochement de deux points matériels, il crée une force de type butée visco-élastique linéaire qui simule le contact volumique de deux sphères impénétrables (figure 9.a). A l'instant même où la vitesse relative des deux points en interaction devient positive (début d'éloignement), une nouvelle longueur au repos du ressort linéaire de la liaison est fixée au milieu du segment [longueur courante, longueur de la butée]. Cette disposition crée une zone attractive (figure 9.b) dont la fonction est de retenir les deux points autour d'une position d'équilibre. Cette nouvelle longueur au repos s'accroît lorsqu'il existe un effort de séparation entre les deux points matériels, jusqu'à retrouver la longueur initiale (affaiblissement de l'énergie de cohésion). Cet affaiblissement de l'énergie de cohésion est de même



nature que celui qui apparaît dans le phénomène de striction (étranglement localisé avant la rupture d'un matériau).

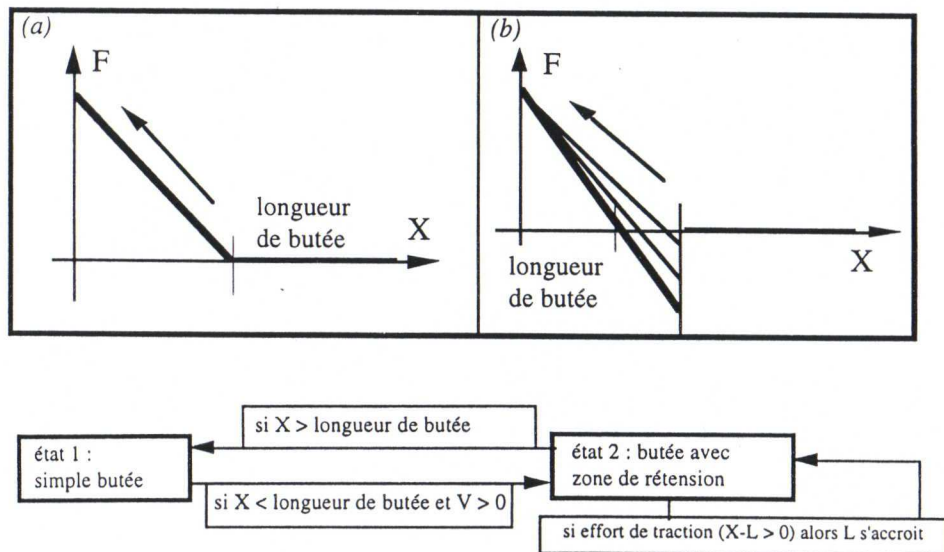


Figure 9. Modèle de butée asymétrique adhérente

Une scène très simple a été réalisée, comportant une goutte d'eau et une sphère. La goutte d'eau, soumise à la gravité, chute sur la sphère, en parcourt le contour jusqu'au point le plus bas, et y adhère encore un moment avant de s'en décrocher. L'intérêt de ce montage est de pouvoir étudier les oscillations de la sphère autour de son point d'ancrage et de recueillir ainsi un son produit par le système : l'adhérence de la goutte d'eau, après percussion, crée une sorte de structure vibrante à deux éléments. L'effet produit est encore plus spectaculaire lorsqu'il y a plusieurs gouttes d'eau en interaction simultanément avec la sphère : le mouvement de chacune des gouttes agit alors sur la fréquence et sur le timbre du son. Des extraits d'un film sont présentés à la fin de cet article.

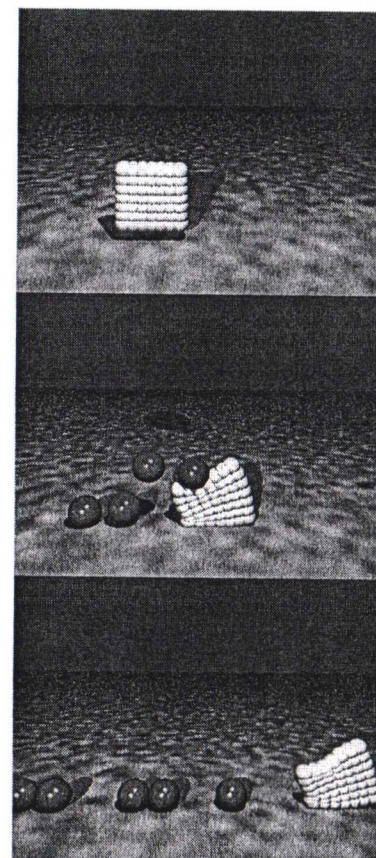
## 8. Conclusion

Nous avons expliqué en quoi le langage de modélisation physique CORDIS-ANIMA, de par ses principes formels, pouvait être un outil passerelle entre les outils de modélisation géométrique et les divers outils de modélisation spécialisés nécessaires dans une activité de CAO : prise en compte expérimentale de comportements dynamiques avant et en complément de l'usage de modeleurs dédiés. Le cas le plus critique, et qui nécessite le plus l'existence de cette passerelle, se présente lorsque les objets ont un comportement dynamique complexe qui empêche de prédéterminer complètement les formes de l'objet. Nous avons pour cela introduit dans le langage CORDIS-ANIMA de modélisation de comportements dynamiques,

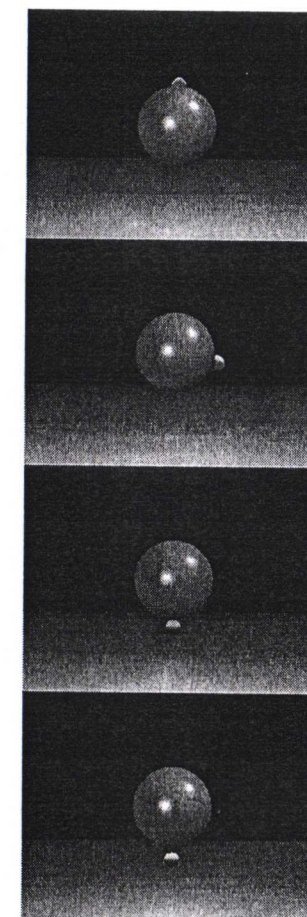
un sous-langage de modélisation d'interactions fortement non-linéaires. Le choix effectué pour ce formalisme est celui d'une description la plus proche possible du phénomène observé, sous forme d'automates d'états à mémoire. Ce sous-langage a été testé sur des exemples et nous a montré qu'il permettait de décrire simplement des interactions physiquement complexes comme par exemple l'interaction d'hystérésis décrivant la modulation de la raideur lors du décrochage adhérent.

## 9. Extraits de films

### Modèle d'objet plastique



### Adhérence d'une goutte d'eau





## J. Bibliographie

- [C 90] FLORENS (JL), CADOZ (C), « Modèles et simulations en temps réel de cordes frottées », 1<sup>er</sup> Congrès Français d'Acoustique, SFA, Editions de Physique, Lyon avril 1990.
- [UC 91] LUCIANI (A), JIMENEZ (S), FLORENS (JL), CADOZ (C), RAOULT (O), « Computational physics : a modeler simulator for animated physical objects », *Proceedings of the European Computer Graphics Conference and Exhibition*. Vienna, Austria, Septembre 91, Editeur Elsevier.
- [L 93] JIMENEZ (S), LUCIANI (A), « Animation of Interacting Objects with Collisions and Prolonged Contacts », *Proceedings of the IFIP WG 5.10 Working Conference. Tokyo April 1993 in Modeling in Computer Graphics* - B. Falcidieno & T.L. Kunii Ed., Springer Verlag Pub., 1993.
- [CAD93] CADOZ (C), LUCIANI (A), FLORENS (JL), « CORDIS-ANIMA: a Modeling and Simulation System for Sound and Image Synthesis-The General Formalism », CMJ, vol. 17-1, spring 1993.
- [L 96] CHANCLOU (B), LUCIANI (A), « Physical modeling and Dynamic Simulation of Off-Road Vehicles and Natural Environments », *Proc. of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'96* IEEE ed., 1996, pp. 505-512.
- [LG 97] LUCIANI (A), GODARD (A) « Construction d'objets physiques obtenus par assemblage physique : modèles et animation », *Revue internationale de CFAO et d'informatique graphique*, vol. 12, n° 1-2, 1997, Editions Hermès, pp. 111-130.
- [MPG 97] GASCUEL (MP), DESBRUN (M), « Animation of Deformable Models Using Implicit Surfaces », *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 3(1), mars 1997.